



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

MATERIÁLY A TVARY KOLEJNIC V KOLEJOVÉ DOPRAVĚ

RAIL MATERIALS AND PROFILES IN RAIL TRANSPORTATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Anežka Svobodová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radovan Galas, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Studentka: **Anežka Svobodová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Radovan Galas, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Materiály a tvary kolejnic v kolejové dopravě

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V kolejové dopravě je v současnosti používána celá řada materiálů a tvarů kolejnic, které jsou voleny s ohledem na místo provozu, zatížení či specifické opotřebení v dané oblasti. Správná volba tvaru a materiálu kolejnic tak může vést k výraznému prodloužení životnosti a zamezení nehod v důsledku jejich porušení.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je zpracovat přehled materiálů a profilů kolejnic využívaných v kolejové dopravě.

Díličí cíle bakalářské práce:

- popsat historický vývoj materiálů a tvarů kolejnic používaných v kolejové dopravě,
- definovat přednosti a negativa současně používaných materiálů a tvarů kolejnic,
- popsat současné trendy v oblasti vývoje kolejnic.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:

CLAYTON, P. Tribological aspects of wheel-rail contact: a review of recent experimental research. Wear. 1996, 191(1-2), 170-183. DOI: 10.1016/0043-1648(95)06651-9.

Wheel-rail interface handbook. 1st pub. Editor R. Lewis, U. Olofsson. Cambridge: Woodhead, 2009, xxii, 842 s. Woodhead publishing in mechanical engineering. ISBN 978-1-84569-412-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Předložená bakalářská práce se zabývá problematikou volby kolejnicových materiálů a profilů. Cílem je podat ucelený přehled o stávající situaci v České republice a některých zahraničních státech. První část práce je věnována ocelím, kde je vždy rozebrána struktura, současné využití a naznačeny oblasti dalšího vývoje. Ve druhé části jsou popsány nejběžnější profily, jejich historie a současný stav. Práce obsahuje také diskuzi, která porovnává stávající problémy a požadavky podstatné pro případný další výzkum.

KLÍČOVÁ SLOVA

kolejnice, ocel, profil, opotřebení

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focused on the issue of the choice of rail materials and profiles. The aim is to give a comprehensive overview of the current situation in Czech Republic and some other foreign countries. The first part is dedicated to rail steels with description of structure, current usage and indication of the scopes of consecutive development. In the second part, there are described the most frequent profiles, their history and the current state. This thesis includes also discussion part which compares current problems and requirements that can be significant to some possible research.

KEYWORDS

rail, steel, profile, wear

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SVOBODOVÁ, Anežka. *Materiály a tvary kolejnic v kolejové dopravě*. Brno, 2018, 40 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Radovan Galas, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému vedoucímu panu Ing. Radovanu Galasovi Ph.D. za ochotu a trpělivost při psaní této práce. Dále pak děkuji své rodině za podporu při psaní i studiu.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Radovana Galase Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

ABSTRAKT	5
KLÍČOVÁ SLOVA	5
ABSTRACT	5
KEYWORDS	5
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	7
PODĚKOVÁNÍ	9
PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE	9
OBSAH	11
1 ÚVOD	13
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	14
2.1 Analýza problému	14
2.2 Cíl práce	14
3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
3.1 Základní pojmy a definice	15
3.1.1 Definice kolejnice, její funkce a části	15
3.1.2 Výroba kolejnic	16
3.1.3 Namáhání a poškození kolejnic	17
3.1.4 Základní požadavky na materiál kolejnic	19
3.2 Materiály kolejnic	20
3.2.1 Stručný náhled do historie vývoje materiálů	20
3.2.2 Základní druhy a značení kolejnicových ocelí	21
3.2.3 Perlitické oceli	21
3.2.4 Bainitické oceli	24
3.2.5 Austenitické oceli	27
3.3 Tvary kolejnic	28
3.3.1 Základní rozdělení	28
3.3.2 Historický vývoj profilů kolejnic	28
3.3.3 Přehled současně využívaných profilů a jejich značení	30
3.3.4 Širokopatní bezžlábkové kolejnice (vignolové)	30

3.3.5	Širokopatní žlábkové a blokové kolejnice	31
4	DISKUZE	33
5	ZÁVĚR	34
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	35
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	38
8	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	39
9	SEZNAM TABULEK	40

1 ÚVOD

Každý člověk, který alespoň čas od času k dopravě použije železnici stihne zajisté postřehnout, že kolejový svršek, který tvoří jízdní dráhu, nenabývá vždy ideální kvality, tudíž neposkytuje odpovídající komfort pro cestování. Můžeme si povšimnout i dalších negativ, jako je hluk, častá údržba trati nebo úplné výměny kolejnic, které vedou nepříjemnostem v podobě výluk či zpoždění.

To jsou však pouze okrajové problémy, které zaznamenáváme jako obyčejní cestující, problematika je totiž mnohem komplexnější a hlubší. Problém návrhu ideálního tvaru a materiálu pro železniční kolejnice přetrvává už od počátků existence železnice a dokonce i z dob před jejím vznikem. Mýlná je totiž obvyklá představa, že kolejnice se začaly používat až při jejím vzniku.

Vzhledem k tomu, že stále přetrvává problém vyvinout kolejnici takovou, která se rychle neopotřebí a zároveň bude dostatečně tvrdá a pevná, jsou na celém světě prováděny výzkumy nových nebo inovace již existujících materiálů. Jejich škála se postupně rozšiřuje, ale ne každý nový materiál se osvědčí jako vyhovující. Velkou motivací je také stránka ekonomická, která zahrnuje nejen výrobní náklady, ale i výdaje spojené s pravidelnou kontrolou, údržbou a personálem, který ji provádí. Při nedostatečné údržbě může totiž dojít až k velmi závažným vadám kolejnic, a tedy i vznik lomu, který se může v provozu stát velmi nebezpečným.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Analýza problému

Opotřebení a vady kolejnic jsou jedním ze zásadních problémů, se kterými se železniční provoz potýká. Faktorů, které míru degradace určují je mnoho. Je to například charakter styku kola s kolejnicí, velikost zatěžování, rychlost nebo i klimatické podmínky. Především materiál hraje v kategorii opotřebení a kontaktní únavy klíčovou roli.

2.2 Cíl práce

Cílem práce je shromáždit a vytvořit pomocí rešerše přehled pojednávající o stávajícím stavu a vývoji kolejnicových materiálů a tvarů. Práce zahrnuje vždy i kapitolu o historii, která může pomoci ve vytvoření představy o vývoji minulosti až do dnešní doby. Celkové zpracování práce by mělo pomoci čtenáři utvořit obraz jak o současném stavu, tak i vývojových trendech a směrech.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Základní pojmy a definice

3.1.1 Definice kolejnice, její funkce a části

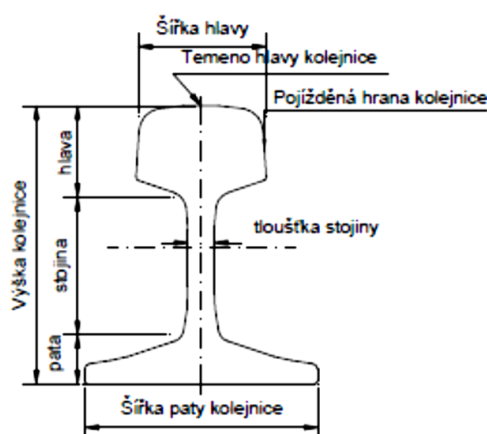
Železniční kolejnice je společně s pražci jedna ze základních částí železničního svršku, kde spolu dvě kolejnice a pražce tvoří kolej. Zároveň je i nejvíce namáhanou částí, protože přichází do bezprostředního styku s železničním kolem, od kterého přejímá síly na malých styčných plochách. [1]

Základní funkce kolejnice jsou:

- Vést směr pohybu železničního dvojkolí a vytvářet pro něj hladkou jízdní dráhu
- Přenášet kolové síly vzniklé odvalováním dvojkolí a rozkládat je do podpor
- Při rozjíždění a brždění přejímat pomocí adheze brzdné a rozjezdové síly

Další funkcí jsou např. zpětné vedení pro napájení na elektrizovaných tratích

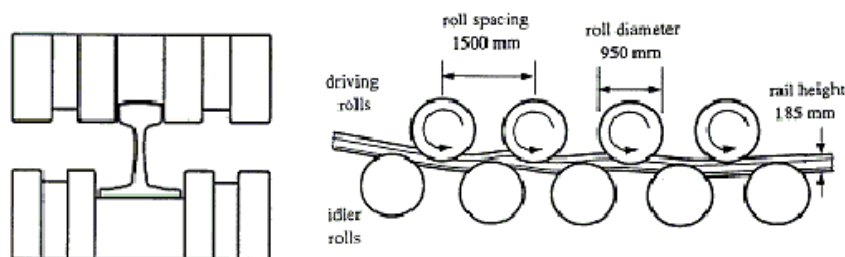
Kolejnice se skládá ze třech základních částí – hlavy, stojiny a paty. Hlava je horní část kolejnice s plochou, která je v kontaktu s kolem. Spodní část je pata, která umožňuje upevnění k pražci nebo k podkladnici. Její šířka musí být odpovídající danému zatížení tak, aby mu kolejnice byla schopna dostatečně odolávat. Pata i hlava přechází plynule do stojiny, která je spojuje. [1]



Obr. 3-1 Základní části kolejnice [1]

3.1.2 Výroba kolejnic

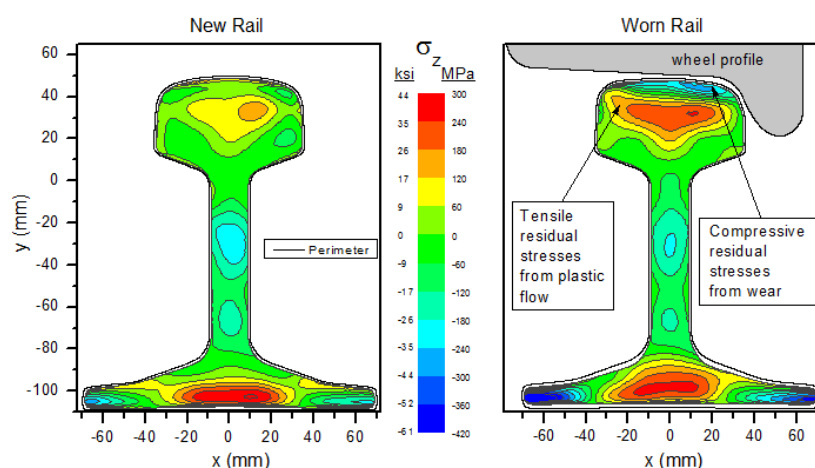
Dnešní technologií výroby kolejnic je válcování za tepla. Nejprve se v konvertoru nebo elektrické peci ocel leguje a následně pomocí kontinuálního lití získáváme předlitky, které mají dlouhý kvádrovitý tvar. Dále následuje dělení polotovarů na požadované délky pomocí kyslíko-methanových hořáků a přesun do krokové pece. Před vstupem do pece jsou předlitky apretací zbaveny nerovností na povrchu. V peci se pak nahřívají tak, aby bylo rozdělení teplot ve všech částech optimální. Proces válcování začíná 1000°C, kdy se nejdříve polotovary předválcují a pak na vratné trati dostávají v kalibrech svůj konečný profil. Válcování končí při teplotě 900°C a vývalky jsou přemístěny na chladicí lože, kde dochází k pomalému snižování jejich teploty, které má vliv na jakost kolejnice. K odstranění deformací vzniklých při válcování a chladnutí slouží rovnání, které probíhá při 65°C a provádí se jak v horizontálním, tak ve vertikálním směru. Pokud má mít kolejnice kalenou hlavu, tak se kalí vyválcovaný tvar před rovnáním. Na závěr se kolejnice opatřují dírami pro spojovací šrouby a prochází kontrolou kvality. [2]



Obr. 3-2 Schéma rovnání kolejnic [26]

3.1.3 Namáhání a poškození kolejnic

Tvar styku kola a kolejnice zásadně ovlivňuje charakter, jakým se bude kolejnice opotřebovávat. Jak již už bylo v úvodní kapitole zmíněno, kolo nápravy a hlava kolejnice přichází společně do bezprostředního styku, je však důležité říci, že napětí je sice maximální v hlavě, avšak je zde nerovnoměrně rozloženo. Vlivem zatěžování vzniká v kolejnici zbytkové tlakové napětí od opotřebení a zbytkové napětí způsobené plastickou deformací. To má za následek vytvoření míst s různě velkou deformací, resp. opotřebením a oblastí náchylných k lomu.



Obr. 3-3 Rozložení napětí v nové a opotřebené kolejnici [25]

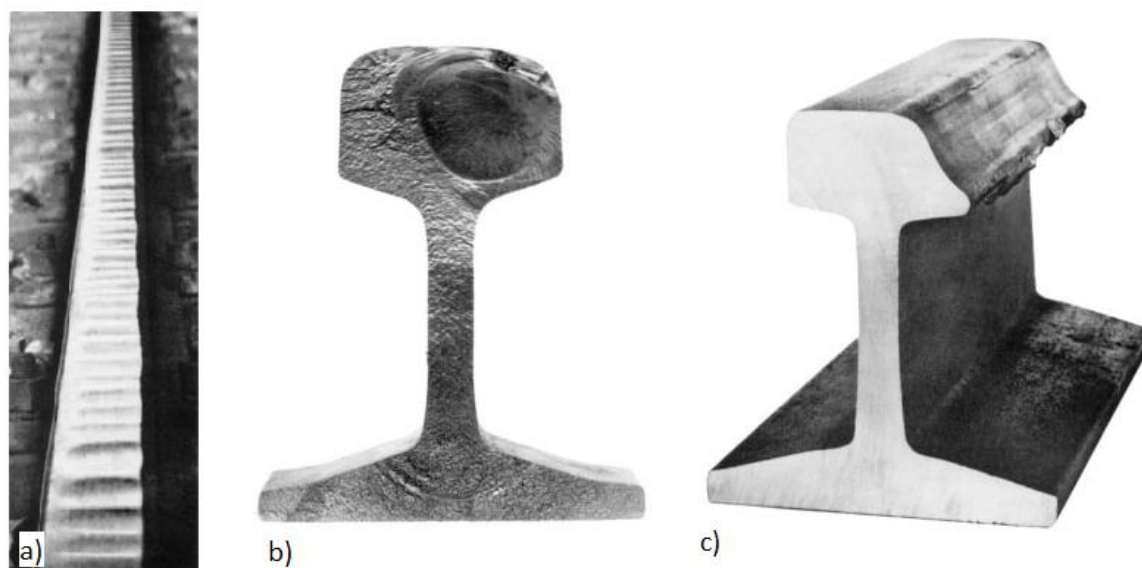
Typickým příkladem je zdeformování pojížděné hrany kolejnice, ke kterému dochází hlavně v obloucích, kde se situace zhoršuje se zmenšujícím se poloměrem oblouku. Jak je vidět na Obr. 3-3, kolejnice v oblouku je náchylná k řadě poškození – k trhlinám od kontaktní únavy, k opotřebení na bocích hlavy, k ojíždění hrany, a navíc ještě k dalším plastickým deformacím v rozích hlavy kolejnice. Důležitou roli hraje i výška, která ovlivňuje typ degradace.

Existuje nepřehledné množství vad a poškození kolejnic, v následujícím výčtu jsou pro představu uvedeny ty nejčastější:

- Odchlupování materiálu z pojížděné hrany (shelling)
- Šikmé trhliny pojížděné hrany (head checking)
- Šikmé trhliny pojížděné plochy (squats)
- Boční opotřebení (ojetí) hlavy kolejnice
- Lom iniciovaný kontaktně únavovými vadami
- Vlnovitost kolejnice



Obr. 3-4 Opotřebení hlavy kolejnice; a) shelling; b) head checking; c) squats [22]

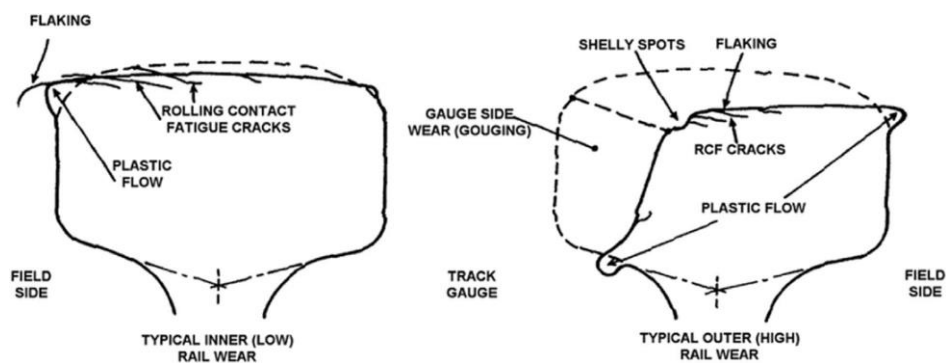


Obr. 3-5 Další druhy poškození kolejnice; a) vlnovitost; b) lom způsobený kontaktní únavou; c) boční opotřebení hlavy [22]

Tab. 3-1 Vliv poloměru oblouku a výšky kolejnice na druhy poškození kolejnice [8]

Poloměr oblouku [m]	Náchylnost k daným vadám		Degradční mechanismy
	Únavové porušení	Opotřebení	
< 600	nízká	vysoká	vysoký profil – boční opotřebení nízký profil – plastická deformace
600-1500	vysoká	střední	vysoký profil – kontaktní únava
1500-2500	střední	nízká	Vysoký profil – kontaktní únava a boční opotřebení
> 2500	nízká	nízká	Vertikální opotřebení, šikmé trhliny na pojížděné ploše

Namáhání je však také do velké míry ovlivněno i změnou tvaru kola danou jeho opotřebením. Při zdeformování dojde ke změně tvaru profilu kolejnice, tedy i jinému rozložení napětí. Na obr. 3-3 je vidět zploštění tvaru hlavy a vznik zbytkových napětí.



Obr. 3-6 Neopotřeбенá vnitřní a opotřeбенá vnější kolejnice v oblouku [27]

3.1.4 Základní požadavky na materiál kolejnic

- Otěruvzdornost – odolnost proti ojždění
- Odolnost vůči kontaktně-únavovým vadám
- Odolnost vůči opotřebení
- Pevnost
- Tvrdost
- Houževnatost
- Dobrá svařitelnost

3.2 Materiály kolejnic

3.2.1 Stručný náhled do historie vývoje materiálů

Už od počátku železniční přepravy byl materiál kolejnic problémovou otázkou. Princip kolejnice se začal využívat už ve starověkém Řecku, kdy se kola povozů pohybovala v kamenných žlabech. Ještě před nástupem koněspřežných drah a parního stroje se dřevěné kolejnice využívaly na důlních drahách. Na začátku 19. století se na ně začaly připevňovat železné pláty, tohoto vylepšení se využilo například na koněspřežné dráze z Českých Budějovic do Lince. Také se používaly kolejnice celé litinové, jejich velkým nedostatkem však byla vysoká křehkost. Proto praskaly, zejména tehdy, pokud nebyly dostatečně usazené. V roce 1820 byly patentovány kolejnice ze svárkové oceli, tzn. oceli s velmi nízkým obsahem uhlíku (méně než 0,08 %), nahradily tak litinové kolejnice a podpořily velký rozvoj stavby železnic. Skutečně ocelové kolejnice se začaly používat později. Poprvé byly použity Velké Británii v roce 1857. Vývoj materiálů postupně přecházel k ocelím s obsahem uhlíku kolem 0,4 – 0,5 % a pevností minimálně 600 MPa. Používala se Thomasova ocel legovaná manganem, která dosahovala velmi nízké vrubové houževnatosti. V padesátých letech došlo v Československu k zavedení kolejnic s pevnostmi od 650 MPa do 800 MPa podle obsahu uhlíku.

Zvýšení obsahu uhlíku umožnilo vakuové odlévání oceli, minimální pevnost se zvýšila na 0,55-0,75 % C a od roku 1968 byly vyráběny kolejnice s pevnostmi od 800 až 950 MPa. Vzhledem ke zvyšujícím se rychlostem a zatížením se zvyšují požadavky na kvalitu, které musí odpovídat evropské vyhlášce UIC 860. [5] [15]



Obr. 3-7 Ukázka dřevěné poplátované kolejnice [7]

3.2.2 Základní druhy a značení kolejnicových ocelí

Kolejnicové oceli lze rozdělit podle struktury materiálu do třech základních kategorií:

- Perlitické oceli
- Bainitické oceli
- Austenitické oceli

Značení jednotlivých druhů ocelí podléhá normě ČSN EN 13 674-1 (označení např. R260), evropské vyhlášce UIC 860 (např. označení UIC 700) nebo existují také ještě stará označení podle ČSD (např. 85 ČSD-Vk). Mezi jednotlivými druhy označení existují ekvivalentní materiály. V zahraničí se můžeme v rámci Evropy setkat se značením podle evropské normy EN 13 674-1, UIC 860 nebo zcela jinými normami typických pro daný stát (např. BS pro velkou Británii nebo v AREMA pro USA)

Tab. 3-1 Ekvivalentní oceli v rámci značení jednotlivých norem

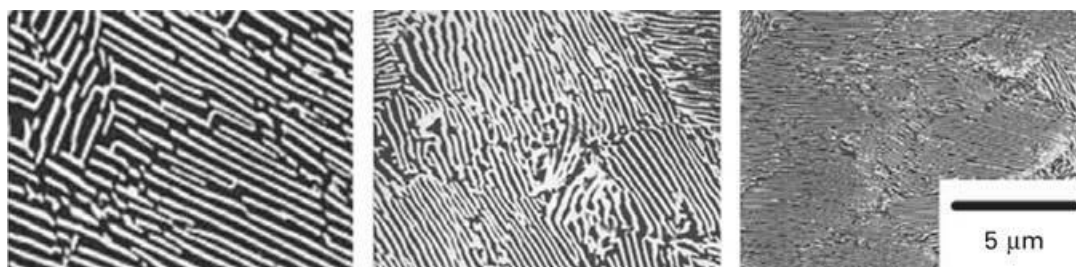
ČSN EN 13 674-1	UIC 860	Označení ČSD
R220	UIC 700	75 ČSD-Vk
R260	UIC 900 A	95 ČSD-Vk
R320Cr	UIC 1100	110 ČSD-Vk-MnCr

3.2.3 Perlitické oceli

Oceli s perlitickou strukturou jsou v použití nejvíce běžné, obsah uhlíku se pohybuje kolem 0,7 % a vyskytují se legované i nelegované s možným tepelným zpracováním. Nedostatkem perlitických materiálů je poměrně rychlé opotřebení a náchylnost ke kontaktně únavovým vadám, tedy i jejich častější výměna.

Struktura a vlastnosti

Perlit je struktura skládající se z feritu a křehkého cementitu. Obě složky jsou mezi sebou uspořádány v lamelách a jejich zvyšující se vzájemná vzdálenost ovlivňuje výslednou tvrdost oceli. Výhodou perlitické struktury je vysoká odolnost vůči opotřebení, způsobená tvrdým cementitem a zároveň plastickým feritem. Cementit však zapříčiňuje i největší nevýhodu, a tou je nízká houževnatost, díky které mohou lehce vznikat lomové vady jak na povrchu, tak i uvnitř kolejnice. Vyšší pravděpodobnost vzniku lomu ovlivňuje spíše velikost zrn než vzdálenost mezi lamelami, proto je snaha zrno zjemnit. [3]



Obr. 3-8 Perlitická struktura v oceli R220, R260 a R350HT [3]

Zjemnění perlitu lze dosáhnout legováním 1 % chromu a tím dosažné větší tvrdosti-legovaná ocel pak dosahuje tvrdosti vyšší přibližně o 100 HB. Pevnost se dá zvýšit přidáním malého množství vanadu, avšak velkou nevýhodou takto upravené kolejnice je špatná svařitelnost a vyšší cena.

Tab. 3-2 Nejběžnější perlitické kolejnice

Označení jakosti	Rm	Obsah C	Tvrdost
	[Mpa]	[%]	[HB]
R 260	min. 880	0,6 0,8	260 300
R 220	min. 770	0,4 0,6	220 260
UIC 900 A	880 1030	0,6 0,8	-
R350HT	min. 1175	0,6 0,8	350 390
R320Cr	min. 1080	0,6 0,8	320 360
UIC 700	680 830	0,4 0,6	-
75 ČSD Vk	734 883	0,45 0,65	219 261
85 ČSD Vk	834 882	0,6 0,8	247 261

Dalším způsobem, jak zvýšit odolnost proti opotřebení je kalení hlavy kolejnice. Tato varianta se začala používat v 80. letech minulého století jako ekonomicky výhodnější alternativa k legování. Kontrolovaným ochlazováním ve vodě lze dosáhnout pevností kolem 300 - 400 HB místo původních 250 HB.

Současné využití

Na českých tratích se v současnosti vyskytují převážně kolejnice z perlitických ocelí, a to především ocel označená jako R260. Tato jakost je vlastnostmi velmi podobná dříve užívané oceli UIC 900 A. Ocel není nijak tepelně zpracována ani legována a vyhovuje běžným podmínkám. Její další výhodou je i příznivá cena, proto je běžná jak u SŽDC, tak i v jiných zemích Evropy. [15]

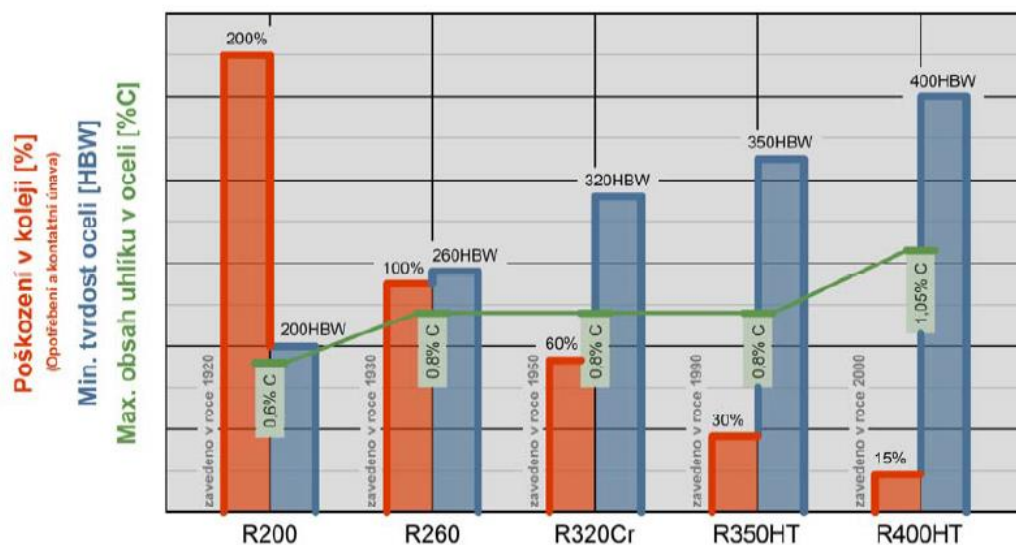
V tramvajové jsou na kolejnice kladeny jemně odlišné nároky, než na kolejnice na „klasické“ železnici. Jsou sice namáhány menším zatížením, co se týče velikosti, na druhou stranu musí odolávat takovým vlivům jako je časté rozjíždění a brždění nebo pískování. Pro tyto účely najdeme u dopravních podniků kolejnicové oceli třídy R200, R220 případně i R260. Velmi dobré chování prokázala legovaná varianta R200V a R220V s malým množstvím vanadu, který umožňuje snížení obsahu uhlíku a stejnou odolnost vůči opotřebení jako mají oceli s vyšší pevností, tzn. třídy R220 a R260. [17]

Zhruba před dvaceti lety se také začala používat ocel R350HT, která předčí klasickou R260 ve dvojnásobně vyšší otěruvzdornosti a odolnosti vůči kontaktně únavovým vadám, hlavně v rychlosti šíření lomu. Používá se zejména v místech náchylných k opotřebení jako jsou např. oblouky s malým poloměrem. Podobným materiálem je i ocel R320Cr s 1% obsahu chromu. Otěruvzdorností a odolností vůči kontaktní únavě se podobá tepelně upravené třídě R350HT, avšak musí se na ni aplikovat složitější způsob svařování, proto není tento materiál běžně využíván. [5]

Trendy ve vývoji

V oblasti perlitických kolejnic je tendence neustálého zjemňování struktury a tedy ke zlepšení mechanických vlastností, jako je otěruvzdornost či houževnatost. Těchto požadavků lze dosáhnout vhodným legováním. Příkladem je třeba legování chromem a molybdenem. Dalším směrem zlepšování vlastností perlitických ocelí je tepelné zpracovávání hlavy kolejnice.

Jednou z poměrně nedávných novinek je vývoj nadeutektoidních ocelí tzv. HE ocelí. Obsah uhlíku se zde pohybuje mimo standartní rozsah, pohybuje se totiž od 0,9 % C výše. Jejich předností je vysoká tvrdost, až nad 400 HB a díky pozměněné struktuře dokáže lépe odolávat kontaktní únavě a vzniku zvlnění. Příkladem takové oceli je třída R400HT, jejíž nasazení v Evropě se postupně více rozšiřuje, jak do oblouků, tak i přímých úseků. [19]



Obr. 3-9 Srovnání perlitických ocelí [19]

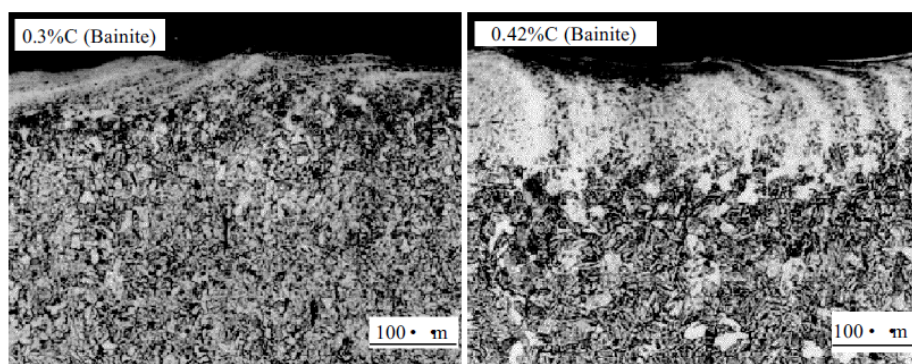
3.2.4 Bainitické oceli

Cílem vývoje bainitických ocelí je zlepšení mechanických vlastností, zvýšení životnosti a zároveň dosažení také snížení materiálových a výrobních nákladů. A právě bainitické oceli představují jednu z možností, jak získat kolejnice z vysoce otěruvzdorného materiálu snášejícího vysoká zatížení a rychlosti. V současné době jsou jedním z hlavních předmětů výzkumu kolejnicových materiálů.

Struktura a vlastnosti

Bainit je nelamelární struktura obsahující shluky cementitu a jehličkovité oblasti feritu. Její jemnost nedovoluje vznik trhlin, proto je struktura prospěšná pro pevnost, tažnost a houževnatost.

U bainitické struktury dochází obecně většímu opotřebení než u perlitické struktury, protože se skládá z částecek karbidu jemně rozptýlených skrz matici jemné feritické struktury. Při provozu kola po bainitické kolejnici způsobí karbid odlupování částecek pryč z feritické matrice. Toto zrychlené opotřebení odstraní únavou poškozenou vrstvu povrchu hlavy kolejnice. Válcovaná kolejnice nízkolegované oceli s bainitickou strukturou, vyvinutá společností Nippon Steel Corporation v Japonsku, má sníženou mez pevnosti kvůli pevné feritické matici a hrubě rozptýleným částčkám karbidů [10][11]. Tento nedostatek se však dá odstranit vhodným legováním, např. chromem, ale tato úprava je však dražší, a navíc dochází ke zvýšení křehkosti.



Obr. 3-10 Bainitická struktura s různými obsahy uhlíku [13]

Současné využití a vývojové trendy

V současné době se bainitické kolejnice v běžném provozu používají pouze některých zahraničních zemích. Na českých tratích byla testovány dva druhy bainitických ocelí – nízkouhlíková a ocel se středním obsahem uhlíku. Nízkouhlíková varianta vydržela méně a byla vyřazena z důvodu kontaktně únavového opotřebení a zvlnění. Středně uhlíkatá ocel vydržela v provozu osm let bez kontaktně únavového poškození. [12]

Použití středně uhlíkatých ocelí vedlo české výrobce k vývoji nového materiálu označeného jako Bainit 1400 s obsahem uhlíku 0,3 % legovanou chromem. Zároveň i společnosti Železářny Třinec a.s. a DT-Výhybkárna a strojírna, a.s. společně vyvinuly ocel Lo8CrNiMo. Jedná se o ocel s nízkým obsahem uhlíku (0,122 %) s několika legujícími prvky určenou speciálně pro výhybky. [12]

V zahraničí se již běžně v provozu vyskytují ve Velké Británii např. jako materiál výhybek v londýnském metru nebo obloucích na tratích určených běžné osobní přepravě. Snahou do budoucnosti je nahradit bainitickými kolejnici stávající úseky, kde je momentálně použita austenitická manganová ocel.

Tab. 3-3 Bainitické oceli testované na českých tratích

Označení oceli	Obsah C	Rm
	[%]	[MPa]
Nízkouhlíkatá bainitická ocel	0,055	883
Středněuhlíkatá bainitická ocel	0,28	1334
	0,30	1336
Bainit 1400	0,3	min. 1400
Lo8CrNiMo	0,122	1185



Obr. 3-11 Srovnání opotřebení bainitické a perlitické kolejnice [20]

3.2.5 Austenitické oceli

Pro místa s velkou dynamickou zátěží a požadavkem na vysokou odolnost proti opotřebení, kde klasické perlitické kolejnice většinou nestačí. Typickým příkladem jsou např. srdcovky výhybek, přesněji jejich hroty.

Struktura a vlastnosti

V austenitických ocelích mají snahu vytvářet při ochlazování křehké částice karbidu, které zhoršují hodnoty požadované vrubové houževnatosti. Problémem je také špatná svařitelnost, která je způsobena právě karbidovými částicemi. Proto byla také snaha o snížení obsahu uhlíku aby bylo zbráněno vytváření křehkého cementitu. Pro dosažení vynikající houževnatosti a zároveň dobré tvrdosti byla již v roce 1883 patentována tzv. Hadfieldova ocel s vysokým obsahem manganu, který činí 12-14 %. Materiál má také schopnost mechanického zpevňování za působení velkých vnějších zatížení dynamického charakteru, proto je schopen je snášet, aniž by byl vystaven nebezpečí křehkého lomu. [3]

Současné využití

V poměrně velkém rozsahu používá austenitická manganová ocel UIC 866. Vyznačuje se skvělou houževnatostí i za nízkých teplot.

Trendy ve vývoji

Austenitické oceli zatím vyhovují současným provozním podmínkám, avšak vzhledem k rychlému zvyšování zatížení se upřednostňuje výzkum a vývoj bainitických ocelí.

3.3 Tvary kolejnic

3.3.1 Základní rozdělení

Kolejnicové tvary lze rozdělit podle funkcí a tvarů do několika základních kategorií:

- Širokopatní
- Žlábkové
- Výhybkové
- Jeřábové
- Blokové



Obr. 3-12 Základní druhy tvarů kolejnic [1]

Širokopatní kolejnice jsou běžné na drtivé většině tratí na světě, jednotlivé tvarové třídy se liší v parametrech hlavy, výšce, tloušťce stojiny a šířce paty. Žlábkové a blokové kolejnice se využívají v tramvajové dopravě, pokud je trať vedena mimo pozemní komunikace, tj. není třeba uložení kolejnic ve vozovce, používají se i kolejnice širokopatní. Speciální tvary mají pak kolejnice výhybkové, konkrétně srdcovkové a jazykové. Okrajově můžeme ještě zmínit jeřábové kolejnice, které se vyznačují zejména nízkou stojinou a plochou hlavou.

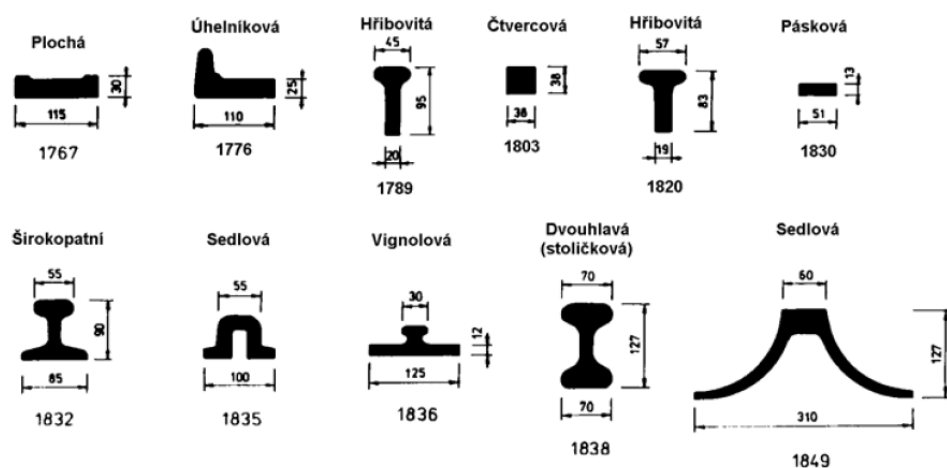
3.3.2 Historický vývoj profilů kolejnic

Stejně jako materiály kolejnic, i jejich tvary prošly poměrně složitým a zajímavým vývojem. Jak bylo již zmíněno v kapitole o materiálech, předchůdkyně kolejnic se využívaly již ve starověkém Řecku, kde tvar vyjeté kolejnice kopíroval profil kol povozů. Měly hloubku 7-10 cm, šířky někdy 20-22 cm, jejich vzdálenost (rozchod) se pohyboval mezi 138 cm až 144 cm [4]. Je zajímavé, že tyto hodnoty zhruba odpovídají dnešnímu standartnímu rozchodu 1435 mm.

V dobách středověku se využívalo dřevěných trámů bez speciálního tvaru. Kolejnice byly pokládány prakticky výlučně v dolech, kde panovaly náročné podmínky (vlhkost, zatížení od důlních vozíků), díky kterým docházelo k poměrně brzkému znehodnocení. Z důvodu prodloužení životnosti se začaly na dřevěné trámy připevňovat železné, či litinové profily tvaru L nebo U. Za zmínku také stojí čtvercová kolejnice, která nahradila na začátku 19. století původní dřevěné hranoly. Tato varianta byla velmi oblíbená na území Velké Británie.

Převrat nastal až na konci 18. století, kdy v Anglii byl poprvé vyměněn tvar L za profil hříbovitého tvaru. Kolejnice neměla vůbec patu a k upevnění sloužilo koncové osazení upevněné v bloku kamene, které bylo poměrně obtížné. Problémy s ukládáním byly odstraněny pomocí dvouhlové kolejnice, které se používaly především v 19. století. Na českém území se objevily již v roce 1839 na trati z Vídně do Brna, poté i z Olomouce do Prahy.

Širokopatní kolejnice byla dalším a v podstatě posledním stupněm ve vývoji, který změnil způsob upevňování kolejnic k podkladnici prakticky do dnešní podoby. V průběhu konce 19. a 20. století byla postupně využívána souběžně s kolejnicí dvouhlovou. Dnes je širokopatní kolejnice nejběžnějším profilem v různých třídách. Do konce 1. světové války nebyly druhy a ani značení profilů jednotné kvůli existenci velkého počtu různých soukromých železničních společností. Až po jejím skončení začalo docházet ke sjednocení. Speciálně u ČSD došlo k zavedení několika profilů jako standartních. [24]



Obr. 3-13 Vývoj tvarů kolejnic v 19. století [1]

3.3.3 Přehled současně využívaných profilů a jejich značení

Dnes se setkáváme převážně s kolejnicemi širokopatními, jiné varianty už se prakticky nevyskytují. Výjimkou je Velká Británie, kde můžeme dodnes nalézt dvouhlové kolejnice upevněné v mohutných podkladnicích. Zaměříme se však na profily používané na českých tratích, protože jsou velmi podobné nebo shodné s velkým množstvím tvarů používaných v Evropě nebo v jiných částech světa.

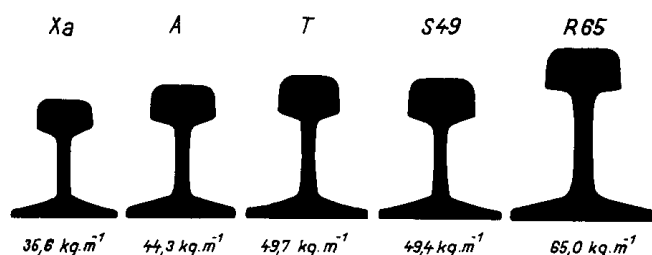
Značení profilů

Dodnes existují dva způsoby značení, a to starší způsob. Značení pomocí písmene a číslice označující hmotnost na délkový metr. Novější značení je prováděno podle UIC.

3.3.4 Širokopatní bezžlábkové kolejnice (vignolové)

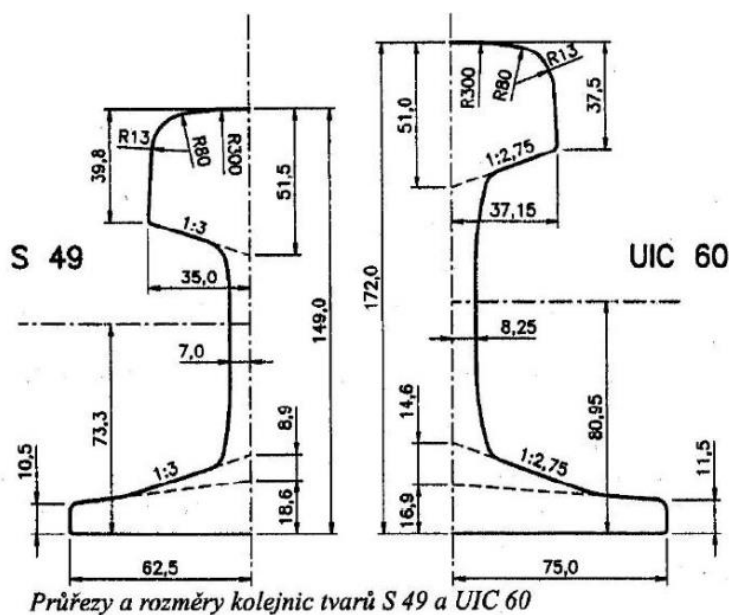
Z důvodu široké oblasti použití širokopatních profilů existuje pro danou kategorii nejvíce variant, které se liší především v geometrii stojiny a hlavy. Dnes se však na české tratích používají jako nové pouze kolejnice S49 (podle evropského značení 49E5) a UIC 60.

Mezi první standardizované profily patří tvar Xa a A, které už najdeme velmi vzácně na regionálních tratích. Byly určeny pro provoz s rychlostí do 100 km/h. Po 2. světové válce došlo k zavedení typu T, ačkoliv byl tento tvar vyvinut již ve 30. letech. Umožňovala rychlost až 150 km/h. Ve 60. letech byla zahájena výroba kolejnic R65 původně ze Sovětského svazu. Byla určena silně namáhané trati a je často k vidění dodnes na rychlíkových tratích, i když jsou od 90. let nahrazovány profilem UIC 60. Nejběžnějším je dodnes na regionálních tratích profil S49, jehož výroba začala v roce 1970 jako náhrada za kolejnici typu T. [24]



Obr. 3-14 Širokopatní tvary používané u ČSD a ČD [24]

V roce 1991 byla u ČD zahájena výroba kolejnic tvaru UIC 60, která je dnes nejužívanější kolejnicí u zahraničních železničních správ. V dnešní době se u ČD užívají pouze nové kolejnice tvaru UIC 60 a S 49. Kolejnice UIC 60 se užívají na hlavních kolejích vybraných tratí (modernizované tratě) a na tratích 1. kategorie s provozním zatížením větším než 18 mil. hrt/rok a dále na předjízdných kolejích těchto tratí, pokud je provozní zatížení v hlavních kolejích větší než 29 mil. hrt/rok. Na hlavních kolejích na tratích 1. kategorie s provozním zatížením menším než 18 mil. hrt/rok a na hlavních tratích 2. a 3. kategorie se užívají kolejnice S 49. Tyto se dále používají v předjízdných kolejích na vybraných tratích a na tratích 1. kategorie s provozním zatížením menším než 29 mil. hrt/rok. V ostatních kolejích se užívají kolejnice užité a regenerované. [14]

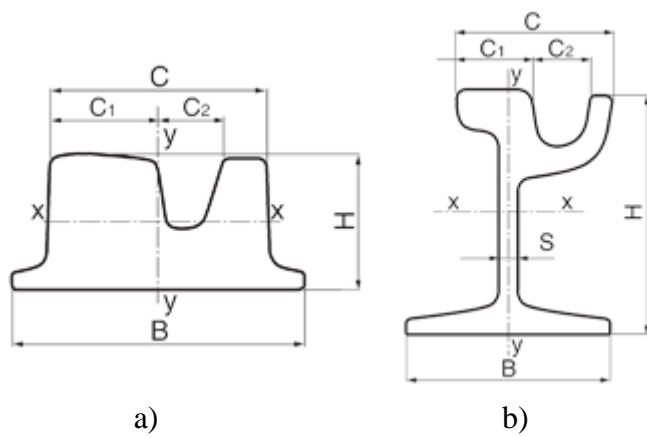


Obr. 3-35 a) kolejnice 54 E 1 (S 49); b) kolejnice 60 E 1 (UIC 60) [9]

3.3.5 Širokopatní žlábkové a blokové kolejnice

Žlábkové kolejnice se využívají společně s blokovými kolejnicemi pro tramvajovou dopravu. V českých městech najdeme nejčastěji širokopatní profily typu NT1 a NT3 a blokové žlábkové profily B1 a B3.

Oba typy NT mají stejnou výšku, šířku hlavy a paty a liší se především šířkou žlábků a tloušťkou stojiny. Jsou využívány výlučně v českých a slovenských městech, kde se však situace město od města velmi liší. Používají se jak na zakrytý kolejový svršek, tak i na otevřených tratích, kde se však musí dbát na větší údržbu jako je čištění a odvodňování žlábků. Proto se kombinují dohromady s profilem S 49, pomocí speciálních přechodů. [9]



Obr. 3-16 a) bloková kolejnice; b) žlábková kolejnice [10]

4 DISKUZE

Co se týká kolejnicových materiálů, tak jich existuje velké množství. V současnosti díky svým dobrým mechanickým vlastnostem stále vedou na trhu perlitické oceli, avšak stále je problém se zvýšením jejich životnosti při zachování těchto vlastností. Je otázkou, kterou cestou se vývoji ubírat. V Česku se ve srovnání s jinými evropskými státy klade důraz na rozvoj v jednom směru, a to je legování a mikrolegování, avšak už se tolik nezabývá například variantami tepelného zpracování nebo vývojem nových materiálů, jakými jsou například bainitické kolejnicové oceli. Je důležité vyhodnotit, jaké vlastnosti ocelí upřednostnit pro české tratě a které naopak by nebyly až tak podstatné. Například zvážit, zda je například zvyšování rychlosti hlavní prioritou nebo je to naopak odolnost vůči opotřebení, a tedy i vyšší životnost a menší nároky na údržbu. V zahraničí se podmínky mohou zcela lišit, ale i navzdory tomu si myslím, že vývoj bainitických materiálů může mít i v České republice velký potenciál.

V části o profilech jsou stručně shrnuty poznatky o stávajících tvarech, které najdeme u českých dopravců. V tomto odvětví se vývoj nepohybuje tak rychle jako v odvětví materiálovém, navíc tvary ovlivňují spíše upevnění kolejnic a kvalitu styku kola s kolejnicí než její samotnou degradaci.

5 ZÁVĚR

V této práci byly shrnuty poznatky o kolejnicových materiálech a tvarech, zaměřené především na využití v českém prostředí. Měla by sloužit jako ucelený náhled na problematiku která se týká použití jednotlivých materiálů a profilů v závislosti k opotřebení a degradaci.

V první části jsme se zabývali materiály, jejich strukturou, vlastnostmi, které z ní vyplývají a jejich oblastmi použití. Součástí bylo také zpracování informací o současných trendech ve výzkumu, které by mohly být nápomocné pro inspiraci k dalšímu výzkumu.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PLÁŠEK, Otto. Železniční stavby: železniční spodek a svršek. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2621-7.
- [2] Jak se maže v železárnách. *Průmyslové spektrum* [online]. 2002, (9) [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/jak-se-maze-v-zelezarnach.html>
- [3] LEWIS, R. (Roger) a Ulf OLOFSSON. Wheel-rail interface handbook. Cambridge: Boca Raton: Woodhead ; CRC Press, 2009, xxii, 842 s. : il. ISBN 978-1-84569-412-8.
- [4] POHL, Rudolf. Dopravní prostředky v plánech a obrazech I: železniční vozidla. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04165-9.
- [5] MIROSLAV, Táborský. Opatření snižující ojždění kolejnic. In: 16. konference „Železniční dopravní cesta 2010“ Pardubice, 23.- 25.3.2010: Sborník přednášek [online]. Praha: Správa železniční dopravní cesty, 2010, 2010, s. 5 [cit. 2019-05-10]. ISBN 978-80-254-6802-2. Dostupné z: <https://www.szdc.cz/documents/50004227/50159407/09sb.pdf>
- [6] TÝFA, Lukáš a Tomáš JAVOŘÍK. *Infrastruktura kolejové dopravy: Železniční svršek* [online]. 2016 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.fd.cvut.cz/personal/tyfal/str/predmety/ikod-pr/ikod04.pdf>
- [7] Upevnění na tratích s parním provozem. *Správa železniční dopravní cesty* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.szdc.cz/o-nas/vse-o-szdc/zeleznice-cr/zajimavosti-z-vyvoje-zelezniciho-svrsku/upevneni-na-tratich-s-parnim-provozem>
- [8] JAISWAL, Jay a Adam BEVAL. Rail Steel Metallurgy: Why Different Elements are Important and Latest ‘Mixes‘. [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/32057/1/PWI%20Seminar%20May%2717%20Final.pdf>
- [9] Kolejový svršek tvořený kolejnicí S49. In: *Pražské tramvaje* [online]. 2010 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.prazsketramvaje.cz/view.php?cislocclanku=2010031701>
- [10] Kolejnice. *Třinecké železářny* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.trz.cz/vyrobky/16/kolejnice>
- [11] HLAVATÝ, Ivo, Eva SCHMIDOVÁ a Marián SIGMUND. *Problematika svařitelnosti bainitických ocelí* [online]. 2006, s. 10 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/Publikace/HlavatyMonter2006.pdf>
- [12] HLAVATÝ, Ivo, Marián SIGMUND, Lucie KREJČÍ a Petr MOHYLA. *The bainitic steels for rails applications* [online]. In: . 2010, s. 8 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/265104833_The_bainitic_steels_for_rails_applications/citations

- [13] YOKOYAM, Hiroyasu, Shinji MITAO, Sadahiro YAMAMOTO, Yuzuru KATAOK a Toru SUGIYAMA. High Strength Bainitic Steel Rails for Heavy Haul Railways with Superior Damage Resistance. In: *NKK TECHNICAL REVIEW* [online]. s. 51 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: http://www.jfe-steel.co.jp/archives/en/nkk_giho/84/pdf/84_07.pdf
- [14] Železniční stavitelství: Příprava přednášek. In: *Fast 10 VŠB* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: http://fast10.vsb.cz/krajcovic/!prezenci/!dopravni_a_hyrotechnicke_stavby/pomucky_k_reseni/pdf/ZELEZNICNI_DOPRAVA_DaHS.pdf
- [15] HLAVATÝ, Ivo. *Zvyšování užitných vlastností vysokouhlíkových materiálů navařováním* [online]. Ostrava, 2003 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/Publikace/HabilTeze2003.pdf>. Habilitační. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [16] Carril 60E1 / UIC 60. *Rails.arcelormittal* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://rails.arcelormittal.com/tipos-rieles/carril-de-transporte/norma-europea/carril-uic60-60e1>
- [17] *Grooved Rails for Tramways Technical Manual* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://constructalia.arcelormittal.com/files/tram_grooved_rails_new_catalog--17417594597cedc877bf44cfaf4f9184.pdf
- [18] *Eur-lex* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=CELEX%3A02002D0732-20130124>
- [19] JÖRG, Albert. Vývojové kroky k vysoce odolné železniční kolejnici. In: *Železniční dopravní cesta 2014* [online]. Praha: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2014, s. 110 [cit. 2019-05-5]. ISBN 978-80-905200-6-6. Dostupné z: <https://www.szdc.cz/o-nas/konference/zeleznicni-dopravni-cesta2014?inheritRedirect=true>
- [20] Novel Steels for Rails. BHADESHIA, H. K. D. H. Bhadeshia. *Encyclopedia of Materials Science: Science and Technology* [online]. 2002. Pergamon Press, 2002, s. 1-7 [cit. 2019-05-16]. ISBN 0-08-043152-6. Dostupné z: <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2002/rail.pdf>
- [21] MÄDLER, K., A. ZOLL, R. HEYDER a M. BREHMER. *Rail Materials -Alternatives and Limits* [online]. s. 9 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267989542_Rail_Materials_-_Alternatives_and_Limits
- [22] S67: Vady a lomy kolejnic. České dráhy [online]. 1997 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: http://iwan.eu07.pl/jw/john_woods2008/predpisy/S/S67.pdf

- [23] HAGARTY, Donald D. The First Railway. In: *Railknowledgebank* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjmpcPdyZ_iAhXRZ1AKHcYYCDwQFjAAegQIABAC&url=http%3A%2F%2Frailknowledgebank.com%2FPresto%2Fcontent%2FGetDoc.axd%3FctID%3DMTk4MTRjNDUtNWQ0My00OTBmLTllyWUtZWfjM2U2OTE0ZDY3%26rID%3DMTkWmg%3D%3D%26pID%3DNzkx%26attchmnt%3DTrue%26uSesDM%3DFalse%26Idx%3DMzQyOQ%3D%3D%26rCFU%3D&usg=AOvVaw3dy5uxp8EZqf2XzAHAH1W2
- [24] Úvod do železničních staveb. In: *Slide Player* [online]. [cit. 2019-05-2]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/1993518/>
- [25] *Applications: Railroad Rail* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.lanl.gov/contour/rail.html>
- [26] TALAMINI, Brandon a Jeffrey E. GORDON. *Finite Element Estimation of the Residual Stresses in Roller-Straightened Rail* [online]. In: . [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/266095612_Finite_Element_Estimation_of_the_Residual_Stresses_in_Roller-Straightened_Rail
- [27] MAGEL, Eric, Peter MUTTON, Anders EKBERG a Ajay KAPOOR. *Rolling contact fatigue, wear and broken rail derailments* [online]. In: . Elsevier B.V. A, 2016, s. 10 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/fulltext/?id=ca2dd2ef-04ac-48b2-9a33-980b4b7ede69>

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

<i>ČSD</i>	Československé státní dráhy
<i>ČD</i>	České dráhy
<i>UIC</i> de fer)	Mezinárodní železniční unie (Union Internationale des Chemins
<i>AREMA</i>	Americká železniční společnost (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association)
<i>R_m</i>	mez pevnosti v tahu
<i>hrt/kg</i>	hrubé tuny za rok

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 3-1	Základní části kolejnice.....	15
obr. 3-2	Schéma rovnání kolejnic	16
obr. 3-3	Rozložení napětí v nové a opotřebené kolejnici.	17
obr. 3-4	Opotřebení hlavy kolejnice; a) shelling; b) head checking; c) squats.....	18
obr. 3-5	Další druhy poškození a) vlnkovitost; b) lom způsobený kontaktní únavou; c) boční opotřebení hlavy.....	18
obr. 3-6	Neopotřebená vnitřní a opotřebená vnější kolejnice v oblouku	19
obr. 3-7	Ukázka dřevěné poplátované kolejnice.....	20
obr. 3-8	Perlitická struktura v oceli R220, R260 a R350HT	22
obr. 3-9	Srovnání perlitických ocelí	24
obr. 3-10	Bainitická struktura s různými obsahy uhlíku	25
obr. 3-11	Srovnání opotřebení bainitické a perlitické kolejnice	26
obr. 3-12	Základní druhy tvarů kolejnic	28
obr. 3-13	Vývoj tvarů kolejnic v 19. století.....	29
obr. 3-14	Širokopatní tvary používané u ČSD a ČD	30
obr. 3-15	a) kolejnice 54 E 1 (S 49); b) kolejnice 60 E 1 (UIC 60)	31
obr. 3-16	a) bloková kolejnice; b) žlábková kolejnice	32

9 SEZNAM TABULEK

tab. 3-1	Vliv poloměru oblouku a výšky kolejnice na druhy poškození kolejnice.	18
tab. 3-2	Ekvivalentní oceli v rámci značení jednotlivých norem.....	21
tab. 3-3	Nejběžnější perlitické kolejnice.	22
tab. 3-4	Bainitické oceli testované na českých tratích	26